

Pemodelan Konsentrasi Partikel Debu (PM₁₀) pada Pencemaran Udara di Kota Surabaya dengan Metode *Geographically-Temporally Weighted Regression*

Kurniasari Aisyiah, Sutikno, dan I Nyoman Latra

Jurusan Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. AriefRahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: sutikno@statistika.its.ac.id

Abstrak - Konsentrasi partikel debu (PM₁₀) di Kota Surabaya menempati urutan pertama di Jawa Timur. Hal ini karena aktifitas penduduk Kota Surabaya yang tinggi menyebabkan polusi udara. Partikel debu (PM₁₀) merupakan salah satu polutan yang apabila terhisap langsung ke dalam paru-paru dan mengendap di alveoli dapat membahayakan sistem pernafasan. Dalam pemantauan kualitas udara, seringkali peralatan pengukur konsentrasi PM₁₀ mengalami kerusakan, sehingga data polutan tersebut tidak terukur atau tidak tersedia (missing), maka perlu dilakukan pendugaan data PM₁₀ pada lokasi yang tidak terukur. Salah satu metode yang digunakan adalah *Geographically-Temporally Weighted Regression (GTWR)* untuk memprediksi konsentrasi PM₁₀ dengan menggunakan parameter meteorologi. Konsentrasi partikel debu bergantung pada lokasi dan waktu. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa kondisi pencemaran udara di Kota Surabaya pada tahun 2010 masih dinyatakan baik dan metode GTWR memberikan hasil yang lebih akurat daripada regresi nonspasial karena dapat mengakomodasi adanya pengaruh heterogenitas spasial dan temporal pada konsentrasi partikel debu (PM₁₀).

Kata Kunci — Partikel debu (PM₁₀), Regresi, Spasial, Temporal

I. PENDAHULUAN

Adanya peningkatan pada komunikasi, inovasi, dan transportasi merupakan dampak positif globalisasi. Namun, secara bersamaan globalisasi turut memberikan dampak pada siklus ekologis berupa polusi. Salah satu polusi pada lingkungan hidup adalah polusi udara. Berdasarkan Baku Mutu Udara Ambien Nasional terdapat 9 jenis polutan dengan nilai baku mutu yakni Sulfur Dioksida (SO₂) 0,1 ppm tiap pengukuran 24 jam, Karbon Monoksida (CO) 20 ppm tiap pengukuran 24 jam, Nitrogen Dioksida (NO₂) 0,05 ppm tiap pengukuran 24 jam, Oksidan (O₃) 0,1 ppm tiap pengukuran 1 jam, partikel ≤ 10 μm (PM₁₀) 150 mg/m³ tiap pengukuran 24 jam, partikel ≤ 2,5 μm (PM_{2,5}) 65 ug/Nm³ tiap pengukuran 24 jam, TSP 230 ug/Nm³ tiap pengukuran 24 jam, Timah Hitam (Pb) 2 ug/Nm³ tiap pengukuran 24 jam, dan Debu Jatuh 10 ton/km²/30hari. Jika kadarnya melebihi nilai baku mutu maka udara ambien dinyatakan tercemar.

Salah satu polutan yang menyebabkan polusi adalah partikel debu (PM₁₀). Dengan uji toksikologi dapat memberikan hasil bahwa partikel debu (PM₁₀) yang terhisap langsung ke dalam paru-paru dan mengendap di alveoli dapat membahayakan sistem [1]. Kadar partikel debu

(PM₁₀) di Kota Surabaya menempati urutan tertinggi di Jawa Timur [2]. Dibandingkan dengan kadar O₃, SO₂, dan CO, partikel debu (PM₁₀) memiliki konsentrasi maksimum yang lebih tinggi di area Kota Surabaya [3]. Peralatan yang digunakan untuk mengukur adalah *Hi-Vol* dengan metode *Gravimetric*. Seringkali peralatan tersebut mengalami kerusakan sehingga konsentrasi partikel debu (PM₁₀) tidak dapat diketahui. Namun, mesin pada Unit Stasiun Pemantau Kualitas Udara (SUF) masih dapat mengukur parameter meteorologi seperti suhu, kelembaban, kecepatan angin dan arah angin. Untuk itu diperlukan pemodelan untuk memprediksi konsentrasi partikel debu (PM₁₀) dengan menggunakan parameter meteorologi.

Penelitian yang membahas pencemaran udara di Kota Surabaya dilakukan oleh Putri yang mengestimasi Nitrogen Dioksida (NO₂) dan Karbon Monoksida (CO) dengan metode interpolasi cokriging [4]. Sementara Choiruddin meneliti kadar BOD Kali Surabaya menggunakan *Geographically-Temporally Weighted Regression (GTWR)* dan menyimpulkan bahwa terdapat efek heterogen spasial dan temporal [5]. Selain itu Huang menggunakan metode GTWR untuk memodelkan variasi harga rumah di Calgary, Canada [6]. Pada penelitian ini metode GTWR digunakan untuk memodelkan partikel debu dengan mengakomodasi adanya pengaruh heterogenitas spasial dan temporal pada konsentrasi partikel debu (PM₁₀).

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Regresi Linier

Analisis regresi linier merupakan suatu metode untuk menjelaskan hubungan antara variabel respon dan variabel prediktor secara linier [7]. Persamaan umum untuk model regresi linier adalah sebagai berikut.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_p X_{ip} + \varepsilon_i$$

Dalam bentuk matriks, persamaan umum model regresi linier adalah sebagai berikut.

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

dengan,

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1p} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{np} \end{bmatrix}; \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix};$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}; \begin{matrix} n = \text{jumlah data} \\ p = \text{jumlah prediktor} \end{matrix}$$

Dengan menggunakan metode *Ordinary Least Square* (OLS) untuk meminimumkan jumlah kuadrat error, maka didapatkan estimator parameter β yakni $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$.

1. Pengujian Hipotesis Model Regresi

Pengujian hipotesis secara serentak dilakukan untuk mengetahui kesesuaian model. Tabel 1 menjelaskan nilai perhitungan pada analisis varians pada model regresi.

Tabel 1. Analisis Varians

Sumber Variasi	Jumlah Kuadrat (SS)	Derajat Bebas (DF)	Rata-rata Kuadrat (MS)	F
Regresi	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	p	$\frac{SSR}{p}$	$\frac{MSR}{MSE}$
Error	$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$n - (p + 1)$	$\frac{SSE}{n - (p + 1)}$	
Total	$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	$n - 1$		

Hipotesis pada pengujian serentak adalah sebagai berikut.

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$$

$$H_1 : \text{minimal ada satu } \beta_k \neq 0 ; k = 1, 2, \dots, p$$

Statistikuji yang diperoleh melalui perhitungan nilai F yang tercantum pada Tabel 2.1 dan daerah kritis yakni tolak H_0 apabila $F > F_{\alpha; p; (n-p-1)}$ atau $p\text{-value} < \alpha$. Jika diperoleh keputusan tolak H_0 , maka dapat disimpulkan bahwa terdapat minimal satu parameter β yang signifikan terhadap respon. Kemudian dilakukan pengujian secara parsial untuk mengetahui parameter β yang signifikan terhadap respon dengan hipotesis sebagai berikut.

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0 ; k = 1, 2, \dots, p$$

Statistikuji yang diperoleh melalui perhitungan nilai t sebagai berikut.

$$t = \frac{b_k}{s} (\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{\hat{\beta}_k}{SE(\hat{\beta}_k)}$$

Daerah kritis pada pengujian secara parsial yakni tolak H_0 apabila $|t| > t_{\frac{\alpha}{2}; (n-p-1)}$ atau $p\text{-value} < \alpha$. Jika diperoleh keputusan tolak H_0 , maka dapat disimpulkan bahwa β_k signifikan terhadap respon.

2. Pengujian Asumsi Residual Model Regresi

Pada analisis regresi terdapat beberapa asumsi residual yang harus dipenuhi yakni residual berdistribusi normal, identik, dan independen. Pengujian asumsi distribusi normal menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov*. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$H_0 : F_n(e) = F_0(e)$$

(residual mengikuti distribusi normal)

$$H_1 : F_n(e) \neq F_0(e)$$

(residual tidak mengikuti distribusi normal)

Statistikuji yang diperoleh melalui perhitungan nilai $D = \sup |F_n(e) - F_0(e)|$ dan daerah kritis yakni tolak H_0 apabila $|D| > D_{\alpha; n}$ atau $p\text{-value} < \alpha$.

Untuk pengujian asumsi identik menggunakan uji *Glejser*. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_n^2 = \sigma^2 \text{ (residual bersifat identik)}$$

$$H_1 : \text{minimal ada satu } \sigma_i^2 \neq \sigma^2 ; i = 1, 2, \dots, n$$

(residual tidak bersifat identik)

Statistikuji yang digunakan, diperoleh dari perhitungan nilai $F = \frac{(\sum_{i=1}^n (|\hat{e}_i| - |\bar{\hat{e}}|)^2) / (p)}{(\sum_{i=1}^n (|\hat{e}_i| - |\bar{\hat{e}}|)^2) / (n-p-1)}$.

Pengujian akan memberikan keputusan tolak H_0 apabila $F > F_{\alpha; p; (n-p-1)}$ atau $p\text{-value} < \alpha$.

Untuk pengujian asumsi independen menggunakan uji *Durbin-Watson*. Hipotesis yang digunakan sebagai berikut.

$$H_0 : \rho = 0 \text{ (residual bersifat independen)}$$

$$H_1 : \rho \neq 0 \text{ (residual tidak bersifat independen)}$$

Statistikuji yang diperoleh melalui perhitungan nilai d yakni sebagai berikut.

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2}$$

Pengujian akan memberikan keputusan tolak H_0 apabila nilai $d < d_{L; \alpha}$ atau $d > d_{U; \alpha}$.

Adanya multikolinearitas yakni terdapat korelasi antar variabel prediktor yang menyebabkan kesalahan pada pendugaan parameter dalam model regresi linier. Untuk mengetahui adanya multikolinearitas dilakukan dengan uji *Variance Inflation Factor* (VIF). Nilai VIF didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut.

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

dengan R_j^2 adalah koefisien determinasi antar variabel prediktor X_j dan variabel prediktor yang lain. Apabila nilai VIF lebih besar dari 10, maka dinyatakan adanya multikolinearitas.

B. Uji Heterogenitas

Untuk mengetahui adanya heterogenitas spasial maka dilakukan pengujian menggunakan uji *Breusch-Pagan*. Hipotesis yang digunakan pada uji *Breusch-Pagan* adalah sebagai berikut.

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_n^2 = \sigma^2 \text{ (homoskedastisitas)}$$

$$H_1 : \text{minimal ada satu } \sigma_i^2 \neq \sigma^2 ; i = 1, 2, \dots, n$$

(heteroskedastisitas)

Statistik uji yang diperoleh melalui perhitungan nilai BP sebagai berikut.

$$BP = \frac{1}{2} f^T Z (Z^T Z)^{-1} Z^T f$$

yang mana nilai vektor f adalah $f_i = \frac{e_i^2}{\sigma^2} - 1$. Nilai e_i adalah *least square residual* untuk observasi ke- i dan Z merupakan matriks berukuran $n \times (p + 1)$ dengan elemen vektor yang sudah dinormal-standarkan untuk setiap observasi. Pengujian akan memberikan keputusan tolak H_0 apabila $BP > \chi^2_{\alpha; (p+1)}$.

Untuk mengetahui adanya heterogenitas temporal maka dilakukan dengan menggambarkan data menggunakan *boxplot*. *Boxplot* digunakan untuk membandingkan karakter distribusi nilai data secara individual atau kelompok kategori dari suatu variabel serta untuk menangkap adanya data yang *outlier*.

C. Geographically-Temporally Weighted Regression

Geographically-Temporally Weighted Regression (GTWR) merupakan metode pengembangan dari *Geographically Weighted Regression* yang mengakomodasi adanya heterogenitas secara spasial (lokasi) dan secara

temporal (waktu) [8]. Persamaan umum untuk model GTWR adalah sebagai berikut.

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i$$

Pada model p adalah jumlah variabel prediktor dan i menunjukkan observasi. Estimasi nilai parameter didapatkan dari perhitungan sebagai berikut.

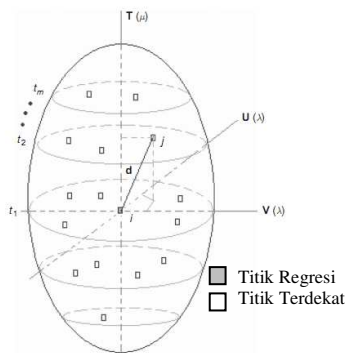
$$\widehat{\beta}(u_i, v_i, t_i) = (X^T W(u_i, v_i, t_i) X)^{-1} X^T W(u_i, v_i, t_i) Y$$

yang mana $W(u_i, v_i, t_i) = \text{diag}(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in})$ dengan n adalah jumlah data observasi. Elemen diagonal α_{ij} ($1 \leq j \leq n$) adalah fungsi jarak ruang (u, v) dan waktu dari (t) sesuai dengan pembobotan pada regresi yang berdekatan dengan titik pengamatan i . Semakin dekat titik yang diamati dengan titik i , maka koordinat memiliki pengaruh yang lebih besar pada estimasi parameter.

Besar pembobotan ditentukan menggunakan fungsi *kernel gaussian* karena menghasilkan hasil yang lebih halus dan standar error yang lebih kecil pada estimasi parameter [9]. Fungsi jarak berdasarkan fungsi *kernel gaussian* adalah sebagai berikut.

$$W_{ij} = \exp\left(-\frac{(d_{ij}^{ST})^2}{h_{ST}^2}\right)$$

dengan d_{ij} merupakan jarak antara titik i dan titik j yang diperoleh dari fungsi jarak *euclidean* yakni $(d_{ij}^S)^2 = (u_i^2 - u_j^2) + (v_i^2 - v_j^2)$ dan $(d_{ij}^T)^2 = (t_i^2 - t_j^2)$. Dan h adalah parameter non negatif untuk penghalus atau biasa disebut *bandwith*. Adanya perbedaan skala secara spasial dan temporal maka sistem koordinat yang digunakan adalah *ellipsoidal*.



Gambar 1 Ilustrasi Jarak Spasial-Temporal
(Sumber : Huang, dkk, 2010)

Pada Gambar 1 dijelaskan bahwa fungsi jarak spasial-temporal dibentuk melalui kombinasi fungsi jarak spasial (d^S) dan fungsi jarak temporal (d^T). Maka fungsi jarak spasial-temporal adalah sebagai berikut.

$$(d^{ST})^2 = \lambda(d^S)^2 + \mu(d^T)^2 \quad (1)$$

dengan λ dan μ menyatakan faktor skala penyeimbang perbedaan efek yang digunakan untuk mengukur jarak spasial dan temporal. Menurut Huang dengan mensubstitusikan fungsi jarak *euclidean* maka persamaan (1) menjadi sebagai berikut.

$$(d^{ST}_{ij})^2 = \lambda[(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2] + \mu(t_i - t_j)^2 \quad (2)$$

Kemudian dengan mensubstitusikan persamaan (2) pada fungsi jarak *kernel gaussian* maka didapatkan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &= \exp\left(-\frac{(d_{ij}^{ST})^2}{h_{ST}^2}\right) \\ &= \exp\left\{-\left(\frac{\lambda[(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2] + \mu(t_i - t_j)^2}{h_{ST}^2}\right)\right\} \end{aligned}$$

dengan h_{ST}^2 adalah parameter *bandwith* spasial temporal dengan $h_S^2 = h_{ST}^2/\lambda$ merupakan parameter *bandwith* spasial dan $h_T^2 = h_{ST}^2/\mu$ merupakan parameter *bandwith* temporal. Dimisalkan τ merupakan parameter rasio μ/λ dengan $\lambda \neq 0$, maka persamaan (2) dapat dibagi dengan λ untuk memunculkan parameter τ sehingga dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut.

$$\frac{(d_{ij}^{ST})^2}{\lambda} = (u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2 + \tau(t_i - t_j)^2$$

Parameter τ didapatkan melalui metode optimasi koefisien determinasi (R^2) secara iteratif. Sehingga estimasi parameter τ dapat menghasilkan R^2 yang maksimum. Parameter τ digunakan untuk memperbesar atau memperkecil efek jarak temporal terhadap efek jarak spasial. Kemudian estimasi parameter μ dan λ didapatkan melalui metode iteratif berdasarkan estimasi parameter τ yang menghasilkan nilai R^2 maksimum. Untuk penentuan *bandwith* spasial temporal dapat diinisiasi dengan menggunakan *bandwith* spasial ditentukan oleh peneliti dengan *trial-error*.

D. Kriteria Kebaikan Model

Kriteria kebaikan model yang digunakan adalah kriteria koefisien determinasi (R^2) dan *Mean Square Error* (MSE). Kriteria R^2 merupakan metode menemukan himpunan variabel prediktor terbaik dalam memprediksi variabel respon melalui model regresi. Model terbaik ditunjukkan dengan nilai R^2 yang paling tinggi untuk setiap unit variabel prediktor dipertimbangkan dalam model. Formulasi perhitungan koefisien determinasi (R^2) adalah sebagai berikut.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Sementara *Mean Square Error* (MSE) digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesalahan berdasarkan nilai residual pada model yang satu dan dibandingkan dengan model yang lainnya.

E. Pencemaran Udara

Udara dinyatakan tercemar apabila mengandung polutan yang kadarnya melebihi nilai baku mutu. Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999, polusi atau dapat disebut pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu. Sedangkan udara ambien adalah udara bebas dipermukaan bumi pada lapisan troposfir yang berada di dalam wilayah yurisdiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan dan mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup dan unsur lingkungan hidup lainnya.

Partikel debu (PM_{10}) merupakan salah satu jenis polutan dengan konsentrasi paling tinggi dibandingkan konsentrasi O_3 , SO_2 , dan CO di Kota Surabaya. Zusanamenyebutkan bahwa faktor yang mempengaruhi konsentrasi partikel debu (PM_{10}) adalah suhu, kelembaban, kecepatan angin, dan arah angin. Artinya perbedaan tempat atau adanya heterogenitas

secara spasial memberikan pengaruh pada konsentrasi partikel debu (PM_{10}) [10]. Selain itu Chaloulakou juga menyebutkan bahwa musim juga memberikan pengaruh pada konsentrasi partikel debu (PM_{10}) [11]. Surabaya merupakan wilayah dengan pengelompokan musim hujan terjadi pada bulan Desember, Januari, dan Februari. Peralihan musim hujan menuju musim kemarau terjadi pada bulan Maret, April, Mei, dan Juni. Musim Kemarau terjadi pada bulan Juli, Agustus, dan September. Dan peralihan musim kemarau menuju musim hujan terjadi pada bulan Oktober dan November [12]. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi partikel debu (PM_{10}) memiliki heterogenitas secara temporal.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Data yang digunakan adalah data sekunder mengenai kualitas udara ambien di Kota Surabaya pada tahun 2010 yang diperoleh dari Badan Lingkungan Hidup (BLH) Kota Surabaya. Terdapat 5 titik pengamatan yang merupakan lokasi penempatan stasiun pemantauan kualitas udara ambien (SUF) yakni : Taman Prestasi di Jalan Ketabang Kali (1), Perak Timur di Jalan Selanggor (2), di Jalan Sukomanunggal (3), Gayungan di Jalan Raya Pagesangan (4), dan Gebang Putih di Jalan Arif Rachman Hakim (5). Namun pada penelitian ini hanya menggunakan tiga titik pengamatan yakni SUF 1 Taman Prestasi, SUF 4 Gayungan, dan SUF 5 Gebang Putih.

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Variabel Penelitian

Kode	Variabel	Satuan
Respon (dependen)	Y Partikel Debu (PM_{10})	$\mu g/m^3$
Prediktor (independen)	X_1 Kelembaban	Persen
	X_2 Suhu	Derajat celcius
	X_3 Kecepatan Angin	m/s

Langkah-langkah dalam menganalisis data penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mendeskripsikan tiap variabel untuk mengetahui karakteristik kondisi pencemaran udara di Kota Surabaya.
2. Mengidentifikasi pola hubungan konsentrasi partikel debu (PM_{10}) dengan variabel prediktor menggunakan analisis korelasi dan diagram pencar.
3. Melakukan pemodelan regresi linier berganda yang meliputi :
 - a. Estimasi parameter.
 - b. Pengujian serentak dan parsial parameter regresi.
 - c. Pengujian asumsi residual model regresi identik, independen, berdistribusi normal (IIDN) dan uji multikolinearitas.
4. Melakukan uji heterogenitas spasial dan heterogenitas temporal.
5. Melakukan pemodelan GTWR yang meliputi :
 - a. Menghitung jarak *euclidean* pada koordinat (u_i, v_i, t_i).
 - b. Mendapatkan estimasi parameter τ optimum secara iteratif dengan nilai awal $\tau_0 = 0.025$ dan $h_{ST} = h_S$ atau *bandwith* spasial, dengan membandingkan nilai R^2 .
 - c. Mendapatkan estimasi parameter μ dan λ .
 - d. Menentukan *bandwith* spasial-temporal (h_{ST}).

- e. Menghitung matriks pembobot model GTWR dengan fungsi *kernel gaussian*.
- f. Estimasi parameter GTWR.
- g. Pengujian asumsi residual model regresi identik, independen, berdistribusi normal (IIDN).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan konsentrasi partikel debu (PM) yang merupakan variabel respon dengan variabel prediktor yakni kelembaban (HUM), suhu (TEMP), kecepatan angin (FF).

A. Deskripsi Partikel Debu (PM_{10}) dan Faktor-Faktor yang Diduga Mempengaruhi

Sebelum melakukan pemodelan dilakukan analisis deskriptif. Tabel 3 menunjukkan bahwa konsentrasi partikel debu memiliki nilai rata-rata yang lebih rendah indeks standart pencemaran udara maka kondisi udara ambien dinyatakan baik. Konsentrasi partikel debu memiliki nilai yang cenderung lebih beragam dibandingkan dengan ketiga variabel prediktor.

Tabel 3. Nilai Rataan, Standar Deviasi, Minimum, dan Maksimum Variabel PM, HUM, TEMP, dan FF di Kota Surabaya 2010

Variabel	Rataan	StDev	Minimum	Maksimum
PM (mg/m^3)	34.90	16.21	6.45	58.39
HUM (%)	79.51	3.58	73.69	83.68
TEMP ($^{\circ}C$)	28.13	0.48	27.22	28.68
FF (m/s)	2.50	1.27	0.819	5.30

Rata-rata konsentrasi partikel debu cenderung tinggi dan nilai standar deviasi yang cenderung rendah terjadi pada musim hujan dan peralihan hujan-kemarau (Tabel 4). Sementara konsentrasi partikel debu memiliki nilai rata-rata cenderung lebih rendah dan beragam pada musim kemarau dan peralihan kemarau-hujan.

Tabel 4. Nilai Rataan, Standar Deviasi, Minimum, dan Maksimum Variabel PM di Kota Surabaya 2010 Berdasarkan Musim

Musim	Rataan	StDev	Minimum	Maksimum
Hujan (Bulan 12, 1, 2)	46.10	4.31	42.01	50.60
Hujan-Kemarau (Bulan 3, 4, 5, 6)	46.91	9.98	40.33	58.39
Kemarau (Bulan 7, 8, 9)	22.73	14.49	7.34	36.11
Kemarau-Hujan (Bulan 10, 11)	23.90	17.5	6.50	41.50

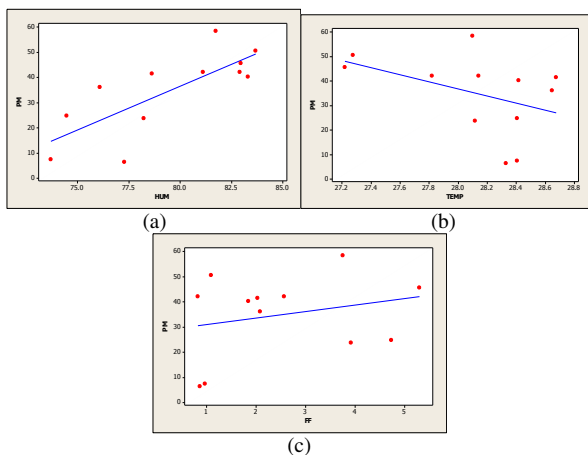
Rata-rata konsentrasi partikel debu pada SUF 1 dan SUF 5 cenderung lebih tinggi (Tabel 5). Hal ini dikarenakan SUF 1 merupakan wilayah pusat kota, perkantoran, dan pemukiman dan SUF 5 merupakan wilayah pemukiman, perkantoran, dan kampus. Kedua lokasi tersebut memiliki aktifitas yang padat dan konstan setiap waktunya. Sementara SUF 4 merupakan wilayah pemukiman dengan intensitas aktifitas yang lebih beragam di setiap waktunya.

Tabel 5. Nilai Rataan, Standar Deviasi, Minimum, dan Maksimum Variabel PM di Kota Surabaya 2010 Berdasarkan Lokasi

Lokasi	Rataan	StDev	Minimum	Maksimum
SUF 1 Taman Prestasi	39.98	2.67	36.11	42.01
SUF 4 Gayungan	26.60	23.00	6.50	50.60
SUF 5 Gebang Putih	38.12	16.90	23.65	58.39

B. Identifikasi Pola Hubungan Partikel Debu (PM_{10}) dan Faktor-Faktor yang Diduga Mempengaruhi

Gambar 2 menunjukkan bahwa kelembaban, arah angin, dan kecepatan angin memiliki hubungan yang positif dengan partikel debu. Sementara suhu memiliki hubungan negatif dengan partikel debu.



Gambar 2. Diagram Pencar antara Partikel Debu dan Variabel Prediktor, (a) Kelembaban (b) Suhu (c) Kecepatan Angin.

Untuk mengidentifikasi pola hubungan lebih lanjut dilakukan dengan analisis korelasi. Sehingga dapat diketahui variabel prediktor yang memiliki pola hubungan yang signifikan terhadap partikel debu.

Tabel 6. Koefisien Korelasi antara Partikel Debu dengan Variabel Prediktor

	Kelembaban (HUM)	Suhu (TEMP)	Kecepatan Angin (FF)
Nilai Korelasi	0.769	-0.467	0.247
P-value	0.003	0.167	0.438

Tabel 6 menunjukkan bahwa suhu memiliki korelasi yang signifikan pada taraf kepercayaan 80% ($\alpha=0.2$). Kemudian kelembaban memiliki korelasi yang signifikan pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha=0.05$). Namun ketiga variabel prediktor tetap digunakan dalam pemodelan karena didasarkan pada penelitian Zusana, dkk pada tahun 2008.

C. Uji Multikolinieritas

Tabel 7 menunjukkan bahwa seluruh variabel prediktor memiliki nilai kurang dari 10. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat kasus multikolinearitas antar variabel prediktor.

Tabel 7. Nilai VIF tiap Variabel Prediktor		
HUM	TEMP	FF
1.829	1.970	1.116

D. Pemodelan Partikel Debu (PM_{10}) Menggunakan Model Regresi Linier

Tabel 8 menunjukkan bahwa dengan taraf signifikansi (α) sebesar 0.05 didapatkan P-value kurang dari taraf signifikansi. Dengan menggunakan nilai statistik uji F yang menunjukkan lebih besar dari $F_{0.5;3;11}$ sebesar 3.59. Hal tersebut menyatakan bahwa terdapat minimal satu variabel prediktor yang berpengaruh pada konsentrasi partikel debu dalam model regresi linier.

Tabel 8 Analisis Varians Model Regresi Linier

Sumber Variasi	Jumlah Kuadrat (SS)	Derajat Bebas (DF)	Rata-rata Kuadrat (MS)	F	P-value
Regresi	1934.7	3	644.9	5.41	0.025
Error	954.2	8	119.3		
Total	2888.9	11			

Setelah diketahui bahwa terdapat minimal satu variabel prediktor yang berpengaruh pada konsentrasi partikel debu, kemudian dilakukan pengujian parsial. Pada taraf signifikansi (α) sebesar 0.05, Tabel 9 menunjukkan bahwa persentase kelembaban berpengaruh signifikan pada konsentrasi partikel debu. Persentase kelembaban yang meningkat akan memberikan dampak peningkatan pada konsentrasi partikel debu. Nilai estimasi parameter suhu dan kecepatan angin yang bernilai positif menyimpulkan bahwa semakin tinggi suhu udara atau semakin panas kondisi udara dan angin yang berhembus lebih cepat akan menyebabkan penyebaran partikel debu di udara juga semakin tinggi. Berikut adalah model regresi linier yang didapatkan :

$$\hat{y} = -551.80 + 4.19x_1 + 8.76x_2 + 2.82x_3 \quad (3)$$

Persamaan (3) menjelaskan bahwa setiap peningkatan 1 satuan pada persentase kelembaban, suhu, dan kecepatan angin dapat meningkatkan konsentrasi partikel debu sebesar 4.19, 8.76, dan 2.82 mg/m³.

Model regresi linier menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang menjelaskan variabilitas konsentrasi partikel debu sebesar 67%. Sementara sisanya sebesar 33% dijelaskan oleh variabel lain yang tidak dimasukkan kedalam model. Didapatkan nilai MSE sebesar 119.3.

Tabel 9. Estimasi dan Pengujian Parameter Model Regresi Linier

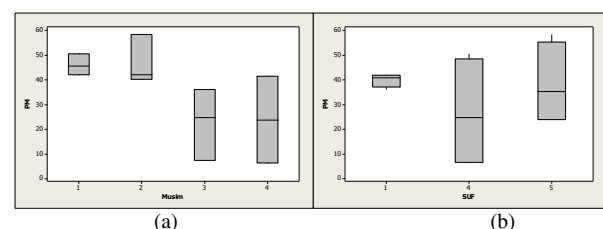
Prediktor	Estimasi Parameter	T Hitung	P-value
Constant	-551.80	-1.58	0.152
HUM	4.19	3.37	0.010
TEMP	8.76	0.90	0.392
FF	2.82	1.27	0.239

E. Pengujian Asumsi Residual Regresi Linier

Pada uji *Glejser* didapatkan P-value sebesar 0.602. Pengujian distribusi normal dengan uji *Kolmogorov-Smirnov* didapatkan hasil P-value lebih dari 0.15. Kemudian dengan jumlah variabel prediktor sebanyak 3, jumlah data sebanyak 12, dan taraf signifikansi 0.05 didapatkan nilai *Durbin-Watson* yakni $dL < 0.82$. Nilai statistik pengujian *Durbin-Watson* sebesar 1.567. Dengan taraf signifikansi 0.05, secara keseluruhan residual telah memenuhi asumsi pemodelan regresi.

F. Analisis Heterogenitas Spasial dan Temporal

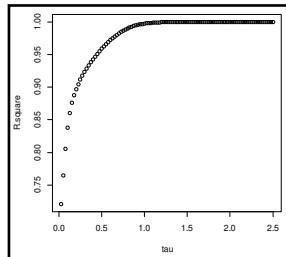
Pengujian *Breusch-Pagan* memberikan hasil nilai 1.765 dengan P-value sebesar 0.6225. Karena P-value lebih dari taraf signifikansi (α) sebesar 0.05, maka tidak terdapat kasus heterogenitas spasial. Artinya, lokasi atau titik pengamatan yang berbeda cenderung tidak memberikan perbedaan variasi pada konsentrasi partikel debu. Dengan menggunakan *boxplot*, Gambar 3 menunjukkan bahwa tiap lokasi memiliki tingkat variasi yang sangat berbeda. Variasi SUF_1 cenderung konstan karena wilayah pusat kota. Sementara variasi berdasarkan waktu pengukuran menunjukkan hasil yang cenderung berbeda dan beragam mengindikasikan adanya kasus heterogen temporal.



Gambar 3. *Boxplot* Partikel Debu Berdasarkan (a) Waktu dan (b) Lokasi

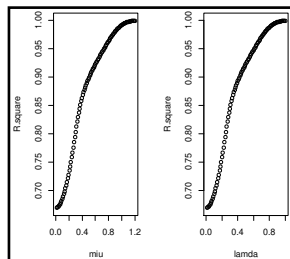
G. Pemodelan Partikel Debu (PM_{10}) Menggunakan Model Spatial-Temporal Weighted Regression

Dalam mendapatkan matriks pembobot, dilakukan perhitungan matriks jarak *euclidean* dengan melakukan estimasi parameter τ dengan menggunakan program R. Estimasi parameter τ dilakukan secara iteratif sebanyak 100 kali dengan nilai awal 0.025 dan nilai *bandwidth* spasial (h_s) sebesar 0.481.



Gambar 4. Iterasi Estimasi Parameter τ

Gambar 4 menunjukkan hasil iterasi estimasi parameter τ yang optimum adalah 1.2 dengan nilai R^2 sebesar 0.99941. Nilai τ merupakan perbandingan antara λ dan μ . Maka selanjutnya melakukan proses estimasi parameter λ dan μ secara iteratif dengan nilai awal λ sebesar 0.012 dan μ sebesar 0.01.



Gambar 5. Iterasi Estimasi Parameter μ dan λ

Gambar 5 menunjukkan hasil iterasi estimasi parameter λ dan μ yang optimum adalah 0.46 dan 0.54 dengan nilai R^2 sebesar 0.90869. Setelah mendapatkan nilai estimasi parameter λ dan μ , maka didapatkan nilai *bandwidth* spasial-temporal (h_{st}) sebesar 0.32623. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan matriks pembobot.

Kemudian dilakukan estimasi parameter β untuk mendapatkan nilai prediksi konsentrasi partikel debu. Terdapat 12 model yang didapatkan dari 12 data observasi (4 musim pada 3 lokasi). Persamaan model GTWR lokasi SUF 1 Taman Prestasi pada musim hujan adalah sebagai berikut.

$$\hat{y} = 473.684 - 1.995x_1 - 9.379x_2 - 1.284x_3$$

Persamaan tersebut menjelaskan bahwa setiap penurunan 1 satuan pada persentase kelembaban, suhu, dan kecepatan angin dapat meningkatkan konsentrasi partikel debu sebesar 1.995, 9.379, dan 1.284 mg/m^3 .

Nilai parameter λ yang lebih besar mengindikasikan bahwa efek heterogen temporal memberikan pengaruh yang lebih besar pada pemodelan. Pada pemodelan GTWR didapatkan nilai R^2 sebesar 0.96415 dan MSE sebesar 8.631. Hal tersebut memberikan kesimpulan bahwa metode GTWR menghasilkan model yang lebih akurat daripada menggunakan metode regresi linier. Sehingga ketika unit pemantau kualitas udara mengalami kerusakan, didapatkan prediksi nilai konsentrasi partikel debu yang

lebih optimal. Kemudian dalam pengujian residual pemodelan GTWR juga telah memenuhi asumsi yakni bersifat identik, independen, dan berdistribusi normal.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Kondisi udara ambien Kota Surabaya pada tahun 2010 dinyatakan baik berdasarkan rata-rata konsentrasi partikel debu (PM_{10}) sebesar 34.9 mg/m^3 . Rata-rata konsentrasi partikel debu cenderung tinggi dan tidak beragam pada musim hujan dan peralihan hujan-kemarau sedangkan nilai rata-rata cenderung lebih rendah dan beragam pada musim kemarau dan peralihan kemarau-hujan.

Berdasarkan kriteria R^2 dan *Mean Square Error* (MSE), pemodelan menggunakan metode GTWR memberikan hasil yang lebih akurat dalam memprediksi konsentrasi partikel debu (PM_{10}) di Kota Surabaya. Efek heterogen temporal memberikan pengaruh yang lebih besar pada pemodelan konsentrasi partikel debu (PM_{10}) di Kota Surabaya.

Saran yang diberikan adalah melakukan kajian mengenai validitas data yang diperoleh dari pengukuran data lingkungan, pengujian heterogenitas spasial dan temporal secara serempak, perbedaan penggunaan fungsi pembobot, dan menggunakan data minimal dua tahun agar dapat melakukan validasi model GTWR.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kusminingrum, N., dan Gunawan, G. (2008). Polusi Udara Akibat Aktivitas Kendaraan Bermotor di Jalan Perkotaan Pulau Jawa dan Bali. Pusat Penelitian dan Pembangunan Jalan dan Jembatan.
- [2] Badan Lingkungan Hidup. (2011). Laporan Status Lingkungan Hidup Provinsi Jawa Timur. Badan Lingkungan Hidup Provinsi Jawa Timur.
- [3] Chamidha. (2004). *Policy For Air Pollution Control Strategy By Using The Air Pollutant Dispersion Model (PM_{10}) In Surabaya*. Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya, Surabaya.
- [4] Putri, D. S. (2013). Estimasi Konsentrasi Nitrogen Dioksida (NO_2) dan Karbon Monoksida (CO) di Udara Surabaya Menggunakan Interpolasi Cokriging. *Skripsi Jurusan Statistika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*.
- [5] Choiruddin, A. (2013). Pemodelan Indikator Pencemar Biological Oxygen Demand di Kali Surabaya Menggunakan Pendekatan Spatial-Temporal Weighted Regression. *Skripsi Jurusan Statistika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*.
- [6] Huang, B., Wu, B., dan Barry, M. (2010). *Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house price*. *International Journal of Geographical Information Science*, 24, 383-401.
- [7] Draper, N.R., dan Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis, Second Edition*. Canada : John Wiley & Sons, Inc.
- [8] Huang, B., Wu, B., dan Barry, M. (2010). *Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house price*. *International Journal of Geographical Information Science*, 24, 383-401.
- [9] Fotheringham, A.S., Brusdon, C., dan Charlton, M. (2002). *Geographically weighted regression Chichester*. United Kingdom : John Wiley and Sons.
- [10] Zuzana, H., Jaroslav, M., Miroslav, K., dan Vitezslav, V. (2008). *Identification of factor affecting air pollution by dust aerosol PM_{10} in Brno City, Czech Republic*. *Atmospheric Environment*, 42, 8661-8673.
- [11] Chaloulakou, A., Kassomenos, P., Spyrellis, N., Demokritou, P., dan Koutrakis P. (2002). *Measurement of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particle concentration in Athens, Greece*. *Atmospheric Environment*, 37, 649-660.
- [12] Aldrian, E., (2001). Pembagian Iklim Indonesia Berdasarkan Pola Curah Hujan Dengan Metode "Double Correlation". *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, Vol. 2, 1, 11-18.